

심해용 무인잠수정 구조의 민감도해석에 의한 최적설계

이재환^{†*}, 허유정^{**}, 정태환^{***}, 이종무^{****}

충남대학교 선박해양공학과^{*}

(주) 태성 에스엔이^{**}

충남대학교 선박해양공학과 대학원^{***}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양개발시스템연구본부^{****}

Optimal Design of the Deep-sea Unmanned Vehicle Frame using Design Sensitivity

Jae-Hwan Lee^{†*}, You-Jung Huh^{**}, Tae-Hwan Joung^{***} and Jong-Moo Lee^{****}

Dept. of Naval Architecture and Ocean Eng., Chungnam National Univ.^{*}

Tae Sung Software & Eng. Corp.^{**}

Dept. of Naval Architecture and Ocean Eng. Chungnam National Univ. Graduate School^{***}

Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering/KORDI^{****}

Abstract

This paper presents the results of the structural analysis and optimal design of the ROV to be operated at 6000m depth in the ocean. This will be the first domestic deep-sea ROV operating with an AUV and a launcher equipped with robot arms and the current weight is about 3 ton. Initial optimal dimension of the frame is determined based on the stress analysis using FEA code ANSYS and design sensitivity and optimization results. The current design is the initial design and there is a possibility to change the design according to the modification of material, equipments and array of structure.

※Keywords: ROV(심해용 무인잠수정), Frame structural analysis(프레임 구조 해석), Design sensitivity(민감도 해석), Optimal design(최적화 설계), Reanalysis(재해석), Natural frequency(고유진동수)

접수일: 2004년 3월 11일, 승인일: 2004년 4월 9일

† 주저자, E-mail: jaelee@cnu.ac.kr

Tel: 042-821-6624, 016-462-6624

1. 서론

현재 전 세계 석유, 천연가스의 28%가 대륙붕에서 생산되고, 머지않아 40%를 상회할 것으로 예상되며 또한 크롬, 망간과 같은 값비싼 심해저 광물의 집광도 선진국 중심으로 증가하고 있다. 그러나 이와 관련된 기술을 개발확보한 선진국에서의 기술보호주의에 의하여 제 3국으로의 기술이전을 기피하고 있다.

따라서 육상의 부존자원이 부족한 우리나라는 심해의 각종 광물자원 탐사 및 채취를 위해 자체 기술 개발이 필요하다. 현재까지 우리나라는 조선과 해운이 발달한 해양국임에 비해 해양자원의 개발이 부진한 편이었는데, 한국해양연구원의 해양시스템안전연구소 (KORDI, KRISO)에서는 해양개발을 위한 초석으로 심해의 탐사 및 광물자원 샘플 채취를 위한 6000 m급 무인잠수정(Remotely Operate Vehicle, ROV)을 개발 중에 있다 (한국해양연구원 2002).

ROV는 모선과 케이블로 연결되어 수중에서 작업을 수행하는데, 사용될 각종 전자 및 기계 장비의 제품사양에 대한 정보가 있으나 ROV의 골격을 유지하는 프레임의 기본 정보는 없으며, 단면의 치수, 단면 위치, 재질 등에 따라서 설계가 다양하게 이루어질 수 있다. 본 논문에서는 6000 m급 차세대 심해용 무인잠수정에 사용될 프레임의 구조 설계를 위해 각종장비와 부력재의 중량을 분포시킨 후 초기설계안에 대하여 유한 요소법 (ANSYS)으로 선형구조해석을 수행하였으며 프레임 각 부재에 대하여 민감도해석 및 최적설계과정을 거쳐 프레임의 최적 디자인을 산출하였다.

2. ROV 프레임 구조 해석

일차적으로 심해용 무인잠수정 프레임 설계를 위한 선행 연구로 연구소에 있는 캐나다제 400 m급 ROV를 분석한 후 구조해석을 하여 잠수정 해석에 대한 신뢰성(경험)을 축적하였다. 다음으로 연구소에서 제시한 초기 디자인의 ROV에 대해 구조해석 및 민감도, 최적 설계 과정을 거쳐 최적의 설계안을 도출 할 수 있었다.

2.1 400 m 급 ROV 구조 해석

Figs.1, 2는 연구소에 있는 400 m급 ROV의 실 사진 및 ANSYS를 사용하여 구한 변위 형상이다. 사용된 재질은 강도 및 강성이 우수하며 내부식성이 뛰어난 재료인 알루미늄 60계열(Al606 1-T6)이며, 경계조건은 부양 고리 끝단을 모두 고정하는 방법을 사용하였다 (이재환 2002).

공기 중에서 ROV는 각종 장비, 프레임 무게 및 부력재의 무게를 포함하여 약 1.5 톤이며 수중에서는 부력재의 부력으로 약 113.4 kg의 여유부력 (pay load)을 갖는다. 여유부력은 작업 중량으로 수중으로 잠수 시에는 남을 탑재 하고 채광 광물을 탑재한 뒤 인양 시에는 남을 버려 부력을 조



Fig. 1 Picture of 400 m ROV

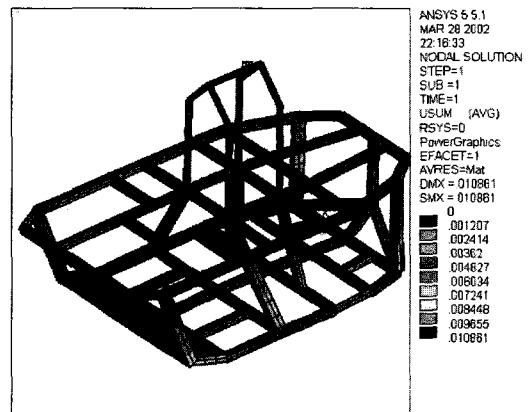


Fig. 2 Displacement of 400 m ROV

절한다. 구조해석 결과, Fig. 2에 보는 바와 같이 각종 장비 및 부력재가 포함된 잠수정의 최대 변위는 로봇 팔이 장착되는 선수 부분에서 10.8 mm가, 최대 Von Mises 응력은 30.1 MPa가 발생하였다.

프레임 설계 시 파단의 기준이 되는 알루미늄 60계열 (Al6061-T6)의 항복응력은 약 270 MPa인데, 부양 및 진수 시 부양케이블의 탄성 및 감쇄 특성, 이동 중에 발생하는 각종 동적 움직임 등을 고려하여 최대 2 g의 가속도가 작용하는 것으로 보면 2배의 하중에 대해 발생 응력은 60.2 MPa가 된다. 용접 시 강도 변화에 대한 정보는 참고문헌 (동양강철 1998)에 따라 달라 항복응력이 1/2 로, 보수적인 경우(ABS 1990, section 6) 1/4정도로 감소하기 때문에 최종 안전계수는 2.24~1.12가 되어 안전한 구조물임을 알 수 있다.

2.2 6000 m 급 ROV 구조 설계

6000 m급 ROV의 구조해석은 400 m급의 결과를 확인한 후 동일한 과정으로 수행되었다. 초기 모델은 Fig. 3과 같고 물성치, 재료는 알루미늄 60계열 (Al6061-T6)로 가정한다. 해상에서 잠수정은 장비, 프레임 자체 무게, 부력재의 무게를 포함하여 약 3 톤에 이르며 수중에서는 부력재의 부력으로 약 130 kg의 여유부력을 가지게 된다. 정확한 장비 무게가 선정된 후 차후 조정이 가능하다. 현재의 장비 무게 및 부력 등은 Table 1에 설명되어 있다. 각 장비의 무게는 프레임에 장착되는 부분의 절점에 집중하중으로, 부력재의 무게는 부력재가 장착되는 상부 프레임에 분포하중으로 설정되었다. 경계조건으로는 ROV가 크레인에 의해 공기 중에 부양될 때 최대 변위 및 응력이 발생하므로 부양 고리 끝단을 완전 고정하여 상용 구조 해석 프로그램 (ANSYS)에 의해 선형 해석을 수행하였다.

구조해석 결과 (Fig. 4), ROV가 공중에 부양될 때 최대 변위는 약 28.2 mm로 선수부 위 끝단에서 발생하는데 이것은 선수부에 장착되는 로봇팔의 무게로 선수부가 선미부보다 더 무겁기 때문이다. 또한 프레임의 전체 응력분포는 약 26 MPa로 재료의 항복응력이 270 MPa이므로 400 m급

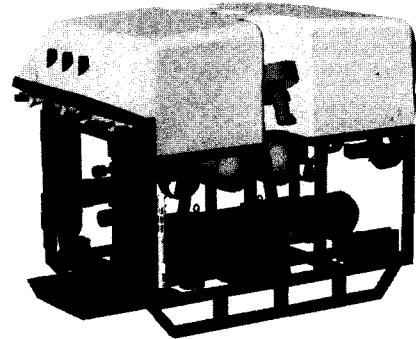


Fig. 3 3D Model of 6000 m ROV

Table 1 Weight of ROV and evaluated ballast

Items	Weight (in air, kg)	Weight (in still water, kg)
1. Structure (Frame)	145.3	42.6
2. Payload	200.0	200.0
3. Propulsion	84.0	70.0
4. Hydraulics	440.1	342.0
5. Electrical & Control	276.6	66.6
6. Navigation & Instrumentation	55.6	16.2
7. Auxiliary Equipment	64.1	30.7
* Weight w/o Buoyant	1,265.7	768.1
* Foam	1357.8	-905.2
Total Weight (kg)	2,623.5	-137.1

에 비해 안정적이다. 변위는 다소 크나 응력 수준이 낮아 파괴가 발생하기 않을 것으로 예상되므로 초기 설계안으로 적용하였다. 동하중과 용접 시 발생하는 강도 저감 1/2과 1/4를 고려하면 안전계수는 (ABS 1990) 최저 1.3 이상이므로 안전한 구조물로 사료된다. 한편 최대 응력은 부양 고리와 부재간의 접합부에서 약 47 MPa이 발생하는데 부양 고리의 현재 강성이 구조를 지지하기에는 부족한 것으로 사료된다. 이러한 국부응력은 부양 고리를 보강함으로써 감소시킬 수 있으며 안전계수 설정에서는 배제되었다. 따라서 400m, 6000m

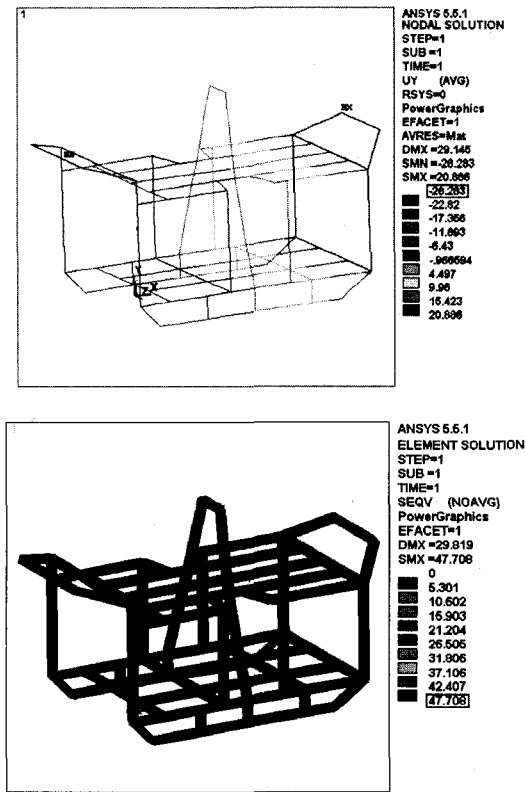


Fig. 4 Displacement and stress of 6000 m ROV

급 모두 발생하는 응력은 26~30 MPa로서 두 구조물의 응력분포가 비슷함을 알 수 있다. 단 처짐이 다소 큰 경향이 있어 로봇 팔 부착부위와 부양고리의 보강 등, 보완이 필요하다.

3. 최적설계

3.1 부재별 민감도 해석 및 최적설계

구조의 변위나 응력에 대한 부재의 두께, 단면 치수 등이 민감한 정도를 정량적인 수치로 알면, 효과적인 변위나 응력 저감이 가능하다. ANSYS에서는 현재 보 요소의 응력에 대한 민감도/최적설계를 제공하지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는, 변위를 제한함수로 하여 최적설계 및 민감도해석을 수행하였다. 설계변수 (D.V.: Design Variable)는 Fig. 5에, 속이 빈 사각형 부양 고리 단면의 두

께와 단면의 폭, 높이를 각각 T1, W1, W2로, 상부, 하부 프레임의 두께를 T2, T3, 세로 및 최하부 부재의 두께를 T4, T5로 정의하였다. ANSYS에서 3차원 선형 보요소를 적합하게 표현할 수 있는 요소인 'BEAM18 8(3D-Linear Finite Strain Beam)'을 사용하였다.

ANSYS에서 최대변위에 대한 최적화와 부재별 민감도(sensitivity)를 산출하였는데 Fig. 6에서 각 설계변수의 ±1% 변화 시, 민감도에 의한 변위의 변화량을 보이고 있다. Table 2에서 T1~W2 변수의 초기치는 5.0~60 mm이며 변위 -28.28 mm에 대해 3.66, 0.17,……, 0.64의 민감도를 보이고 있다. 각 SET별 D.V.에서 SET 1은 초기 설계변수(각 단면의 치수) 값이고, SET 2는 최적화된 치수 값, SET 3는 민감도를 이용하기 위한 정수화 된 재해석용 치수 값이다. Displacement는 초기 해석 변위, 최적화 결과 변위, 민감도 이용 재해석 변위이고, ANSYS disp.의 SET 2, 3는 각 SET 별 치수를 사용하여 ANSYS로 재해석한 변위 값이다.

최적화 결과로 변위는 -22.13 mm (15.8% 감소), 중량은 120.89 kg (16.8%) 으로 상당량 감소했으나 Von Mises응력이 47.70 MPa에서 50.71 MPa로 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 최적화 결과는 최대응력이 발생하는 부양 고리 두께(T1)와 접합되는 하부 프레임의 두께(T2)가 5 mm에서 각각 4.74 mm, 4.0 mm로 감소되었기 때문이다. 한편, 실제 생산을 위한 조건을 고려 시 부재 치수의 정수화 등 또 다른 제한성을 고려한다면 SET 2의 실수 변수치 선택이 어려워지는데, SET 3처럼 민감도만을 이용하여 부재치수 변경에 따른 변위 변화량을 예측할 수 있다.

변위에 대한 치수 민감도는 변위의 치수변수 미분치, 즉 기울기로 볼 수 있다 (이재환 1991). Table 2의 민감도의 경우 T1, 즉 부양 고리 두께의 민감도가 제일 크지만, Fig. 6에서는 설계변수 ±1% 변화 시의 변위의 변화량을 나타내고 있으므로 상부 부재의 W1과 W2의 치수 값이 커서 변위 변화량에 큰 역할을 하고 있다.

초기설계 (SET 1)에 대한 각 부재의 변위, 중량, 민감도를 고찰 한 후, 변위와 응력 저감을 위해 부양 고리 두께 T1과 하부 프레임 두께 T3를

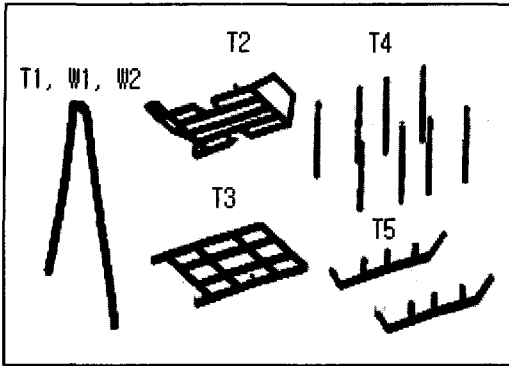


Fig. 5 Design Variables of frame

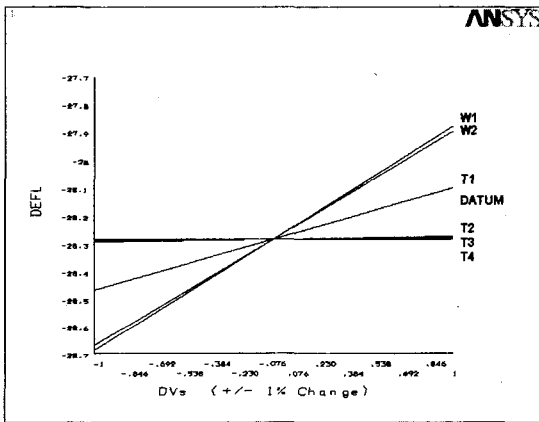


Fig. 6 Change in displacement due to 1% change of design variables

(최적결과와 역으로) 각 5.0에서 6.0으로, W1~W2도 60.0에서 65.0으로 증가, T2, T4, T5는 5.0에서 4.0으로 감소시키면, 민감도와 치수 변화량에 의해 민감도 식 (1)으로 구한 새 변위 값 (-18.32 mm)이 계산될 수 있다 (이재환 1994, 이재환/이광한 1995, 이재환/이광한 1996, 이재환 등 1997).

$$\delta_{new} = \delta_{old} + \sum_i \delta'_i \Delta T_i \quad (1)$$

$$= -28.28 + (6-5)*3.66 + (4-5)*0.17 + (6-5)*0.13 + (4-5)*0.08 + (4-5)*0.18 + (65-60)*0.67 + (65-60)*0.64 = -18.32$$

민감도에 의한 재해석 결과 변위와 중량 모두

Table 2 Results of optimization and redesign using sensitivity

D.V. (mm)				
Sensitivity	ID of D.V.	SET 1 (org.)	SET 2 (opt.)	SET 3 (sen.)
3.66	T1	5.00	4.74	6.00
0.17	T2	5.00	4.00	4.00
0.13	T3	5.00	4.00	6.00
0.08	T4	5.00	4.01	4.00
0.18	T5	5.00	4.00	4.00
0.67	W1	60.00	65.61	65.00
0.64	W2	60.00	65.19	65.00
Displacement		-28.28	-22.13	-18.32
ANSYS disp.		-28.28	-23.82	-20.69
Von mises stress		47.70	50.71	43.54
Weight		145.31	120.89	138.23

각 -18.32 mm, 138.23 kg으로 감소하였다. 이때 두께 치수 변화의 증분 량이 커서 식 (1)에 의한 변위와 ANSYS에서 이 설계치로 직접 구한 변위 -20.69 mm 사이에 오차 2.3 mm가 발생하고 있다. 선형해석 후 설계 변경 량이 과다한 경우 민감도 재해석과 실제 유한요소 해석 간에 다소 차이가 발생하므로 설계 시 이를 참조항이 필요하다. ANSYS 최적화 결과인 SET 2의 변수로 재해석을 하여도 -23.82 mm가 산출되어 최적화 과정의 결과도 주의하여 검토할 필요가 있다.

3.2 고유치에 대한 최적설계

초기 설계 변수 (Tables 2, 3 의 SET 1)로 진동해석을 한 결과 고유진동수가 11.29 Hz로서 추진기의 회전에 의한 (약 700RPM, 11.67 Hz) 진동을 고려할 경우, 공진 영역을 회피하는 설계안이 필요하다. 중량저감과 고유치 제한 조건 하에서 ANSYS의 최적설계를 수행한 결과 Table 3에 SET 2와 같은 부재 치수, 고유치, 중량 안이 산출되었다. 그러나 이 결과의 설계치수는 변위 최적화 결과와 상충된다. 즉 정적과 동적 최적화시 설

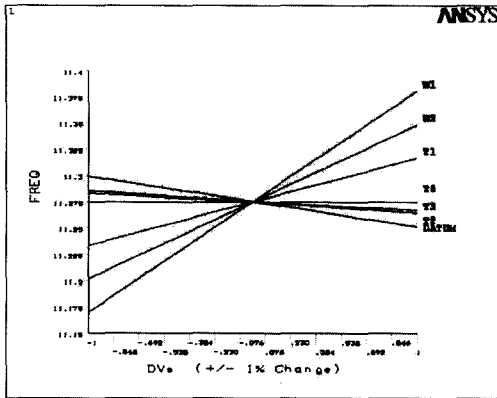


Fig. 7 Change in natural frequency due to 1% change of design variables

Table 3 Results of optimization and reanalysis of natural frequency using sensitivity

D.V. (mm)				
Sensitivity	ID of D.V.	SET 1 (org.)	SET 2 (opt.)	SET 3 (sen.)
0.041	T1	5.00	4.00	6.00
-0.024	T2	5.00	4.00	4.00
-0.010	T3	5.00	4.00	6.00
-0.007	T4	5.00	4.00	4.00
-0.007	T5	5.00	4.00	4.00
0.105	W1	60.0	49.44	65.00
0.073	W2	60.00	49.44	65.00
Frequency		11.29	9.41	12.23
ANSYS freq.		11.29	8.43	14.51
Weight		145.31	116.71	138.23

계 치수가 서로 다르므로 단일 설계 치수가 필요하다. 따라서 강도와 강성을 유지하는 Table 2의 SET 3와 동일한 Table 3의 SET 3 설계치수로 진동해석을 한 결과, 동일한 중량 (138.23 kg)에서

민감도 재해석에 의해 고유치가 12.23 Hz인 설계안을 도출할 수 있다. 또한 이 치수를 사용하여 ANSYS로 재해석을 수행하면 고유치가 14.51 Hz이므로 공진영역을 충분히 회피하는 디자인임을 알 수 있다. 따라서 민감도 재해석결과를 직접 사용하기 보다는 민감도 정보를 이용하여 설계변경을 시도한 후, 유한요소 재해석등으로 유용한 디자인을 도출하는 과정이 설계에 기여할 수 있겠다. (이재환/이광한 1995, 이재환/이광한 1996, 이재환 등 1997)의 경우에는 NASTRAN, ANSYS의 진동변위와 고유변위를 이용하여 연속법으로 민감도를 구하고 재설계를 시도하였으나, 현재는 상용 구조해석 코드들이 이와 같이 민감도와 최적화를 제공하고 있다.

4. 결론

심해저용 무인 잠수정 (ROV)의 초기 설계안에 대한 구조해석 결과는 다음과 같다.

- (1) 현재 사용 중인 400 m 급 잠수정의 구조해석을 수행하여 안전계수의 범위를 확인함으로써 6000 m 급에도 적용할 수 있는 방안이 도출되었다.
- (2) 설계자의 판단이 도입된 설계를 위해 민감도를 이용한 재해석 개념이 도입되었고 변위, 응력 및 중량이 모두 감소되는 부재치수가 산출되었다. 단순히 최적화를 수행하는 것보다 민감도를 이용하여 정/동적 해석 결과를 검토하며 최적의 설계안을 도출할 수 있게 민감도가 활용되었다. 또한 민감도 정보를 이용하여 설계변경을 시도한 후, 유한요소 재해석등으로 결과를 확인하고 최적화 결과도 검토하여, 유용한 디자인을 도출하는 과정이 설계에 적용되었다. 향후에는 정/동적 최적화 과정을 통합할 수 있는 보다 체계적인 Multidisciplinary 최적화 과정이 필요하다.
- (3) 최종적인 장비 선정 및 배열, 프레임 재료 (예, titanium) 선정, 치수 변경 등 실제 ROV 제작 시 까지는 여러 변경 사항이 있을 수 있으나 본문에서 적용된 기법의 적용으로 최적의 프레임 치수를 도출할 수 있겠다.

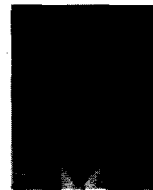
후 기

본 연구는 해양시스템안전연구소의 2002년도 “차세대 심해용 무인잠수정 개발 과제”의 위탁 연구 결과의 일부분으로 위 기관의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (주)동양강철, 1998, AI 특성 및 선박용 AI Alloy
- 이재환, 1991, “설계 민감도해석,” 대한조선학회지, 제28권, 제3호, pp. 79-85.
- 이재환, 1994, “선박 구조 설계에서의 민감도 해석,” 대한조선학회지, 제31권, 제1호, pp. 23-33.
- 이재환, 이광한, 1995, “구조물 진동제어를 위한 설계민감도해석 및 최적설계,” 대한조선학회 논문집, 제32권, 제4호, pp. 64-72.
- 이재환, 이광한, 1996, “연속법에 의한 설계 민감도를 이용한 판구조물의 조화진동저감,” 한국소음진동공학회지, 제6권, 제1호, pp. 27-34.
- 이재환, 장강석, 신민용, 1997, “연속법에 의한 판구조 고유진동수의 민감도해석,” 한국해양공학회지 제1권, 제1호, pp. 3-9.

- 이재환, 2002, 심해 무인 잠수정의 내압장치 구조해석에 관한 연구, 충남대학교 연구보고서.
- 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, 2002, 차세대 심해용 무인 잠수정 개발.
- ABS, 1990, Underwater Vehicles, Systems and Hyperbaric Facilities. Notice No. 1
- ANSYS, 2002, Design Optimization Seminar.



<이 재 환 >



< 허 유 정 >



<정 태 환 >



< 이 종 무 >